

ГІДРОДИНАМІКА ТА КІНЕТИКА СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ НЕПРАВИЛЬНОЇ ФОРМИ У ЩІЛЬНОМУ ШАРІ

© Тимо І.Я., Ханик Я.М., Ярош Я.Д., 2008

Подано експериментальні залежності гідродинаміки та кінетики сушіння дисперсного матеріалу (солоду) у щільному шарі і наведено узагальнення дослідних даних.

The experimental results of drying of shallow dispersion warmly isolating materials in a dense layer represented.

Постановка проблеми. З [1] відомо, що сушіння являє собою складний процес, від організації якого значною мірою залежить і якість висушеного матеріалу. Особливе місце в різних галузях промисловості посідає сушіння дисперсних матеріалів [2].

Одним із перспективних методів зневоднення дисперсних матеріалів є сушіння у щільному шарі [3]. У промислових умовах сушіння солоду характеризується великими питомими енергозатратами, тривалістю процесу, що негативно впливає і на якість висушеного солоду.

З метою інтенсифікації сушіння такого матеріалу та зниження питомих енергозатрат необхідно вивчити гідродинаміку та кінетику процесу зневоднення, обґрунтувати параметри процесу і узагальнити результати досліджень, що дасть змогу прогнозувати його перебіг.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сушіння дисперсних матеріалів, як уже згадувалось, має широке використання у різних галузях промисловості. Найбільш поширені методи – конвективне зневоднення, сушіння у киплячому шарі [4, 5]. Однак ці методи характеризуються великими енергетичними затратами, тривалістю процесу, сушильні агрегати металомісткі і займають значні виробничі площі. А під час сушіння у киплячому шарі відбувається стирання матеріалу, утворення дрібнодисперсної фази, яка виноситься із сушарки, що зумовлює необхідність встановлення пилоочисної апаратури. З [3] відомо, що сушіння у щільному шарі має багато переваг перед іншими методами як з точки зору інтенсифікації зневоднення, так і з погляду зменшення питомих енергозатрат, і широко використовується для сушіння дисперсних матеріалів. Однак використати безпосередньо отримані результати досліджень для прогнозування перебігу сушильного процесу досліджуваного матеріалу неможливо, оскільки об'єкти досліджень відрізняються фізико-хімічними властивостями, енергією зв'язку вологи із матеріалом, дисперсним складом, формою частин, їх орієнтацією стосовно руху теплоносія, вільним об'ємом шару тощо. Це відноситься і до сушіння солоду.

Мета роботи – вивчення можливості інтенсифікації процесу сушіння досліджуваного матеріалу, зменшення питомих енергозатрат. Для реалізації поставленої мети нами проведено експериментальні дослідження з гідродинаміки та кінетики сушіння та узагальнено результати досліджень. Вивчення гідродинаміки та кінетики процесу зневоднення солоду проводилось на установці, яка дає змогу реалізувати процес сушіння досліджуваного матеріалу у щільному шарі, у випадку, коли теплоносій рухається в напрямку зовнішня поверхня шару – перфорована решітка. Висота шару солоду дорівнює $H = 6 \cdot 10^{-2}$ м. Температура теплоносія не перевищувала $T = 80$ °С (згідно з технологічними вимогами), швидкість теплоносія змінювалась в інтервалі 0.48 – 1.2 м/с.

Першим етапом дослідження було вивчення гідродинаміки під час руху теплоносія крізь шар сухого матеріалу (солоду). На рис. 1 показано гідродинамічну залежність, із якої випливає, що на

гідродинамічний опір шару впливає як інерційна, так і в'язкісна складові (спостерігається параболічний характер залежності $\Delta P = f(\omega)$).

На основі узагальнення результатів отримано залежність:

$$\Delta P = \xi' \cdot H \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}; \quad (1)$$

$$\xi' = \frac{\lambda}{d_{екв}}.$$

Метою узагальнення було визначення ζ' :

ΔP – гідравлічний опір шару, Па;

ζ' – риведений коефіцієнт опору, 1/м;

H – висота шару матеріалу, м;

ρ – густина повітря, кг/м³;

λ – коефіцієнт тертя;

$d_{екв}$ – еквівалентний діаметр, м;

ω – умовна швидкість руху теплоносія, м/с.

Для досліджуваного матеріалу $\zeta'=10573$ – 1/м.

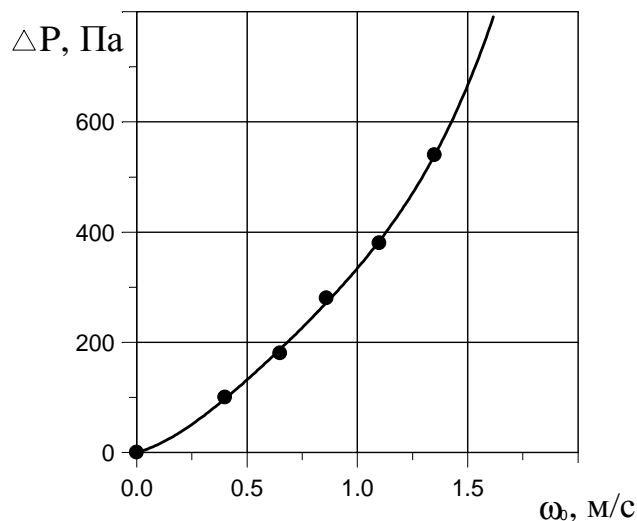


Рис. 1. Залежність гідравлічного опору шару сухого матеріалу (зерен солоду) від фіктивної швидкості руху теплоносія за умов: $t = 20$ °С, $H = 6 \cdot 10^{-2}$ м

Результати дослідження кінетики сушіння показано на рис. 2 у координатах $\lg(W - W_p) = f(\tau)$. З метою їх узагальнення, із якого випливає, що критична вологість $W_{кр}$ (точка перетину прямих) дорівнює приблизно 4,5 %, а критичний час $\tau_{кр}$, який відповідає $W_{кр}$, за різних швидкостей є різним.

Графічні залежності до точки перетину, починаючи від ординати $\lg(w_0 - w_p)$, відповідають швидкості сушіння у першому періоді, а прямі після точки $\lg(w_{кр} - w_p)$ відповідають швидкості сушіння у періоді падаючої швидкості.

Кінетичне рівняння другого періоду має вигляд [6]:

$$\frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = \exp(-K \cdot (\tau - \tau_{кр})) = \exp(-\chi \cdot N \cdot (\tau - \tau_{кр})), \quad (2)$$

де W – поточна вологість матеріалу у другому періоді, %; W_p – рівноважна вологість, %; $W_{кр}$ – критична вологість, %; K – коефіцієнт сушіння, 1/с; τ – поточний час сушіння, с; N – швидкість сушіння у першому періоді, %/с; χ – відносний коефіцієнт сушіння, 1/%.

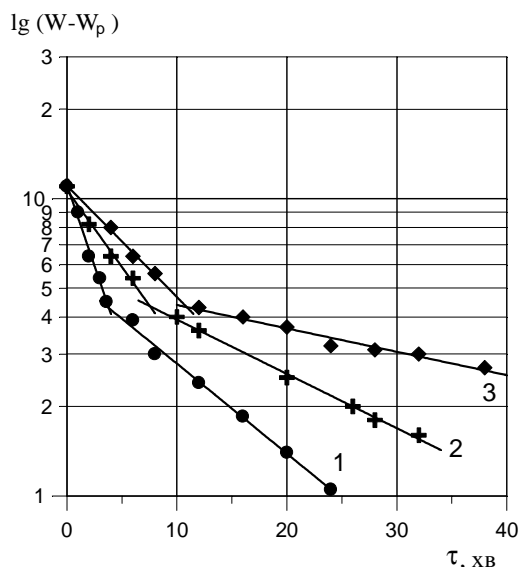


Рис. 2. Узагальнення результатів кінетики сушіння зерен солоду у нерухомому шарі за температури теплоносія $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$.
За умов: 1 – $\omega_0 = 1,2\text{ м/с}$; 2 – $\omega_0 = 0,72\text{ м/с}$; 3 – $\omega_0 = 0,48\text{ м/с}$

Рівняння (2) дійсне для зміни вологості за $W < W_{кр}$.

Для визначення відносного коефіцієнта сушіння χ побудуємо графічну залежність коефіцієнта сушіння K від швидкості сушіння N $K = f(N)$ (рис. 3):

$$K = \chi \cdot N; \quad (3)$$

$$\chi = \operatorname{tg} \alpha. \quad (4)$$

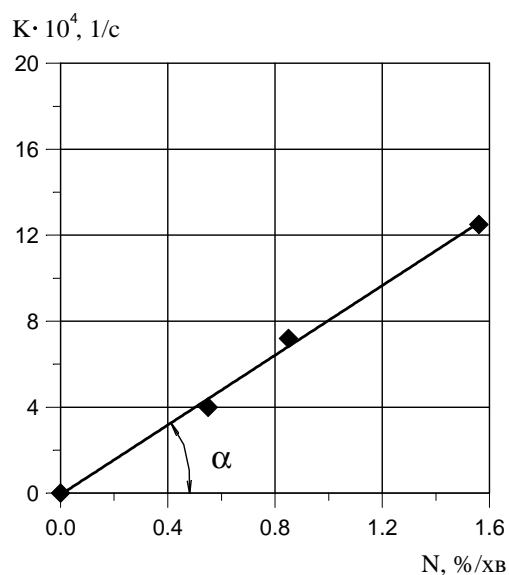


Рис. 3. Визначення відносного коефіцієнта сушіння χ ($t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Із отриманої залежності визначили величину відносного коефіцієнта сушіння χ для досліджуваного матеріалу, що дорівнює $\chi = 4,5 \cdot 10^{-3} 1/\%$.

Коефіцієнт сушіння K для кожної із швидкостей руху теплоносія визначався згідно з залежністю [6]:

$$K = 2,3 \cdot \frac{\lg(W_1 - W_p) - \lg(W_2 - W_p)}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (5)$$

де τ_1, τ_2 – поточний час сушіння, с; W_1, W_2 – відповідно вологість матеріалу за τ_1 і τ_2 , %; W_p – рівноважна вологість, $W_p \approx 1\text{ }%$.

Залежність $\tau_{кр}$ для різних швидкостей руху теплоносія через шар матеріалу описується рівнянням (рис. 4):

$$\tau_{кр} = 542 \cdot (1,55 - \omega), \quad (6)$$

де ω – швидкість руху теплоносія, м/с.

Залежність швидкості сушіння у першому періоді від швидкості руху теплоносія носить параболічний характер (рис. 5) і описується рівнянням:

$$N = 0,02 \cdot \omega^{1,13}. \quad (7)$$

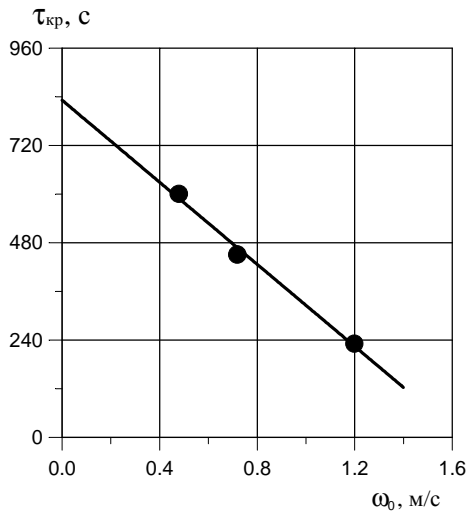


Рис. 4. Залежність критичного часу сушіння від швидкості руху теплоносія ($t = 80$ °С)

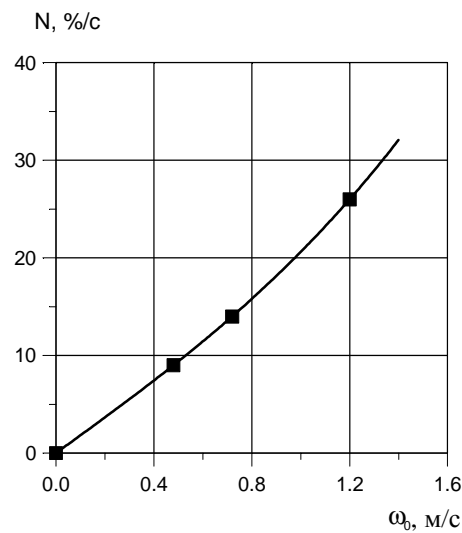


Рис. 5. Залежність швидкості сушіння в першому періоді від швидкості руху теплоносія

Зміна вологості у часі до досягнення $W_{кр}$ описується рівнянням [6]:

$$W = W_0 - N \cdot \tau, \quad (8)$$

де τ – поточний час, с; W_0 – початкова вологість матеріалу %/с.

Для досліджуваного матеріалу:

$$W = 11 - 0,02 \cdot \omega^{1,13} \cdot \tau. \quad (8.a)$$

Залежність (8) дійсна до досягнення $\tau = \tau_{кр}$. Залежність (2) з врахуванням залежності (7) має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} &= \exp\left(-4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02 \cdot \omega^{1,13} \cdot (\tau - \tau_{кр})\right) = \\ &= \exp\left(-9,0 \cdot 10^{-5} \cdot \omega^{1,13} \cdot (\tau - \tau_{кр})\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Загальний час сушіння досліджуваного матеріалу описується рівнянням [6]:

$$\tau_3 = \frac{W_0 - W_p}{N} - \frac{1}{\chi \cdot N} \cdot \left[1 + 2,3 \cdot \lg \chi \cdot (W - W_p)\right]. \quad (10)$$

Висновок. Експериментально досліджено гідродинаміку та кінетику сушіння солоду. За результатами експериментальних досліджень визначено критичну вологість досліджуваного матеріалу $W_{кр}$ (точка перетину прямих), яка приблизно дорівнює 4,5 %, Проведено узагальнення результатів досліджень і отримано розрахункові залежності, які дають змогу прогнозувати процес.

1. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М.: «Пищевая промышленность», 1973. – 528 с. 2. Аэров М.Э., Тодес О. М., Наринский Д. А. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. – Л.: Химия, 1979. – 176 с. 3. Ханик Я.М., Станіславчук О.В., Дулеба В.М. Сушіння пастоподібних матеріалів у щільному шарі // Науковий вісник: Збірник науково-технічних праць. – 2003. – Вип. 13.1. – С. 147–150. 4. Романков П.Г. Рашиковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. – Л.: Химия, 1968. 358 с. 5. Ханик Я.М., Станіславчук О.В. Термолabile материалы. Кинетика конвективного сушіння // Хімічна промисловість України. – 2005. – №2 (67). – С. 36–38. 6. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: «Энергия», 1968. – 472 с.